

УДК 621.391.825

А.С. Вершинин, Д.Ю. Майков, Д.Н. Ушарова, А.С. Аникин

Экспериментальная оценка статистических характеристик узкополосных радиопомех диапазона 433 МГц в городских условиях

Приведены результаты экспериментальной оценки статистических характеристик мощности, вероятности наблюдения, количества и длительности радиопомех, принимаемых в условиях городской застройки от узкополосных источников излучения со слабонаправленными антеннами в диапазоне 433 МГц. Показано, что в диапазоне 430–435 МГц с вероятностью около 3% наблюдается шесть источников помех с максимальной мощностью минус 38 дБмВт.

Ключевые слова: радиопомеха, диапазон 433 МГц, мощность, вероятность, длительность, количество источников помех.

В настоящее время для решения задач народного хозяйства широкое распространение получили приёмопередающие устройства в нелицензируемом радиодиапазоне 433 МГц с максимальной разрешённой выходной мощностью передатчика 10 мВт [1–3]. Миниатюрные приёмопередатчики диапазона 433 МГц применяются для дистанционного мониторинга и управления объектами промышленности на урбанизированной территории, автоматизированного удалённого сбора данных от приборов учёта электроэнергии, температуры, для обмена данными в беспроводных радиосетях, в сигнализациях или системах охраны удалённых объектов, а также в пультах дистанционного управления электронными игрушками или радиомоделями [2–4]. Из-за сложной электромагнитной обстановки в диапазоне 433 МГц при проектировании радиосистем полезно иметь сведения о количестве и ожидаемом уровне мощности радиопомех для обеспечения надёжной передачи информации. Приём узкополосной помехи большой мощности (по сравнению с мощностью полезного сигнала) в полосе полезного сигнала приводит к перегрузке приёмного тракта, возрастанию битовой вероятности ошибки, и, возможно, к нарушению сеанса радиосвязи. Априорные сведения о статистических характеристиках узкополосных радиопомех позволяют на этапе проектирования систем передачи информации обоснованно выбрать методы помехоустойчивого кодирования, сетку и алгоритм смены частоты радиопередатчика.

В открытых источниках [5–12] крайне скудно представлена информация о статистических характеристиках узкополосных радиопомех диапазона 433 МГц и, как правило, отсутствует информация об используемом при измерении оборудовании, а экспериментальные результаты представлены в виде амплитудных спектров при настройке анализатора спектра в режиме однократного измерения или в режиме накопления [8]. Так, в работе [10] приводятся результаты экспериментальной оценки распределения вероятностей амплитуд для сигналов диапазона 433 МГц, принимаемых в полосе 30 кГц на территории сталелитейного завода, где основные источники радиопомех этого диапазона (дистанционно управляемые двери, промышленные роботы и краны) приводят к серьёзным авариям на производстве. Согласно приведённым результатам, мощность радиопомех диапазона 433 МГц достигает 40 дБм с вероятностью 10^{-6} и 100 дБм с вероятностью около 10^{-1} .

Другим источником радиопомех диапазона 433 МГц являются так называемые активные RFID-метки, используемые для радиочастотной дистанционной идентификации объектов. Такой тип идентификации активно внедряется зарубежными авиакомпаниями для контроля на борту воздушного судна процесса загрузки и выгрузки багажа, транспортировки иных грузов, а также бортовых приборов и деталей (например, спасательные жилеты, кресла и т.д.). В работе [12] представлены результаты экспериментальной оценки мощности излучения двух RFID-меток диапазона 433 МГц. Согласно выводам авторов, мощность излучения активных RFID-меток на основной частоте и на частоте гармоник превышает максимальный уровень излучения, установленный стандартом DO-160E.

В этих и многих других работах основной статистической характеристикой помехи является вероятность распределения амплитуд. Однако для проектирования беспроводных систем сбора дан-

ных нередко требуется знание временных характеристик радиопомех (например, средний интервал времени между помехами, средняя длительность помехи и т.д.). В связи с отсутствием в доступной литературе этих и других параметров радиопомех актуальной является задача экспериментальной оценки статистических характеристик узкополосных помех в радиодиапазоне 433 МГц. В качестве параметров радиопомех рассматриваются мощность, количество одновременно наблюдаемых источников помех и вероятность их наблюдения, средняя длительность (продолжительность) помехи, средний интервал времени между помехами.

Цель статьи – оценить статистические характеристики узкополосных радиопомех диапазона 433 МГц по результатам экспериментальных измерений в городских условиях.

Оборудование и методика экспериментальной оценки. Экспериментальные измерения проводились в различных жилых районах г. Томска в осенний период. Источниками помех являются радиосигналы от сторонних источников излучения в частотном диапазоне 433 МГц, нарушающих работу приёмного устройства радиосистемы передачи информации. В качестве сторонних источников излучения в диапазоне 433 МГц рассматривалось радиоэлектронное оборудование: автосигнализации, портативные радиостанции, пульты управления воротами и т.д. Для обеспечения репрезентативности выборки измерения проводились в различных районах г. Томска: от спального района до центральных проспектов с оживлённым движением. Наименование пунктов экспериментальных измерений и их местоположение указаны в табл. 1.

Таблица 1

Наименование и местоположение пунктов измерений

№	Наименование	Местоположение пунктов измерений в г. Томске
1	Пункт 1	Перекрёсток ул. Учебная – пр. Ленина
2	Пункт 2	Перекрёсток ул. Косарева – пр. Кирова
3	Пункт 3	Перекрёсток ул. Елизаровых – пр. Кирова
4	Пункт 4	Окрестность ул. 19-я Гвардейская дивизия и ул. Фёдора Лыткина

На выбранной позиции по ежесекундным круглосуточным измерениям за интервал времени с пятницы по воскресенье (трёхсуточные измерения) включительно определялись средняя, среднеквадратическая, полная и максимальная мощность принимаемых сигналов по результатам оценки спектральной плотности мощности.

Для проведения измерений использовались поверенные средства измерения и оборудование:

- анализатор спектра Agilent N9917A;
- антенна диапазона 433 МГц с коэффициентом усиления около 0,5 дБ и полосой 40 МГц;
- ноутбук с предустановленным программным обеспечением (ПО) для регистрации сигналов;
- сетевой фильтр;
- кабель Ethernet.

Измерения проводились с помощью программного обеспечения на ноутбуке, которое позволяло с определённым временным интервалом оценивать спектральную плотность мощности принятого антенной сигнала. Подключение ноутбука к анализатору спектра осуществлялось через патчкорд.

Установка оборудования осуществлялась в комнате жилого помещения на первом или втором этаже у оконного проёма.

Экспериментальная оценка мощности помех выполнялась по требованиям [13].

В качестве статистических характеристик радиопомех диапазона 433 МГц определялись:

- вероятность появления помех $D(\Delta f)$;
- среднее значение мощности помех $m_{P_{ro}}$ на частоте f ;
- среднеквадратическое значение $\sigma_{P_{ro}}$ мощности помех на частоте f ;
- полная мощность помех $P_{ro} = \sqrt{m_{P_{ro}}^2 + \sigma_{P_{ro}}^2}$;
- средняя длительность помех и средний интервал времени между излучениями помех.

Помимо этого, определялась максимальная мощность помех $P_{ro, \text{макс}}$ за весь сеанс измерений.

Длительность помехи определялась по совокупности реализаций спектральной плотности мощности для каждого частотного подканала (или поддиапазона полосой 25 кГц), утверждённого ГРЧ для диапазона 433 МГц, и вычислялась как время присутствия сигнала радиопомехи в некотором частотном подканале.

Интервал времени между помехами определялся по совокупности реализаций спектральной плотности мощности как время отсутствия сигнала радиопомехи в некотором частотном подканале.

Так как интервал времени и длительность помехи являются случайными величинами, то определялись их средние значения. Средние длительность помехи и интервал времени между излучениями помех определялись по совокупности всех частотных подканалов, для которых были зафиксированы помеховые излучения.

Среднее и среднеквадратическое значения мощности помехи вычислялись по известным формулам теории вероятностей и математической статистики для несмещённой оценки случайной величины [2].

Математическое ожидание и среднеквадратическое значение мощности помехи вычислялись по известным формулам теории вероятностей для несмещённой оценки случайной величины [2].

Все вычисления выполнялись в полуавтоматическом режиме с помощью предустановленного программного обеспечения на ЭВМ. В качестве исходных данных для вычисления использовались массивы, содержащие отсчёты спектральной плотности мощности радиопомех в некотором частотном диапазоне и соответствующие этим отсчётам границы частотных подынтервалов быстрого преобразования Фурье. На одной позиции производилось не менее 256000 измерений спектральной плотности мощности.

Ниже для примера представлены результаты экспериментальных измерений для одного пункта. Для остальных пунктов результаты измерений приведены в сводную таблицу.

Условия и результаты экспериментальных измерений для пункта № 1. Оборудование для проведения экспериментальных измерений размещалось на первом этаже типового многоквартирного дома. Экспериментальные измерения получены по трёхсуточным измерениям (24–26.10.14), проводимым в диапазоне частот от 400 до 450 МГц с частотным разрешением 10 кГц. Интервал между измерениями составлял одну секунду, а точность измерения длительности помехи и интервала времени между излучениями помехи не хуже одной секунды. Приёмный пункт располагался в окрестности ул. Учебная и пр. Ленина г. Томска, на дистанции не менее 15 м от которого в условиях прямой видимости и дифракции располагались потенциальные источники помех диапазона 433 МГц (охранные системы, автосигнализации и т.д.).

Для определения факта наличия помехи пороговым методом оценивался уровень внутренних шумов анализатора спектра. Уровень спектральной плотности мощности в приёмном канале при указанном частотном разрешении в среднем составлял около минус 86,3 дБм. Обнаружение помехи на частоте f происходило в момент превышения спектральным отсчётом порога «три сигма», равного $P_{п} = m_{P_{ro}} + 3 \cdot \sigma_{P_{ro}}$.

Приведём некоторые результаты экспериментальных измерений. Результаты измерения частотной зависимости максимальной за трое суток мощности $P_{ro, макс}$ помех представлены на рис. 1.

Количество источников помех $N_{п.}$, одновременно (т.е. в реализации спектральной плотности) наблюдаемых в частотном диапазоне 400–450 МГц, по результатам трёхсуточных наблюдений представлено в виде гистограммы распределения на рис. 2. Количество источников помех определялось по количеству занятых частотных каналов (или поддиапазонов полосой 25 кГц), утверждённых нормативными документами для диапазона 433 МГц.

Результаты частотно-временного анализа помех в диапазоне 430–435 МГц, от-

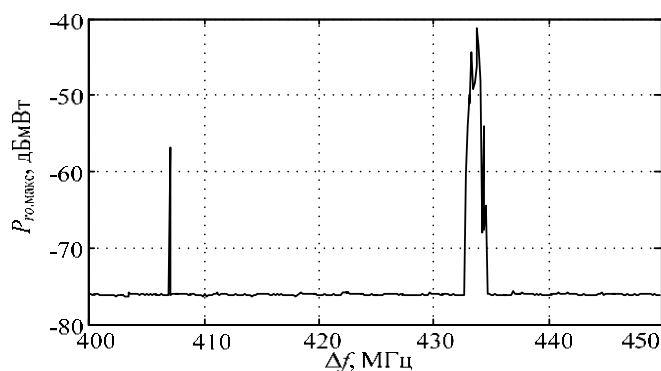


Рис. 1. Частотная зависимость максимальной (за трое суток) мощности $P_{ro, макс}$ радиопомехи

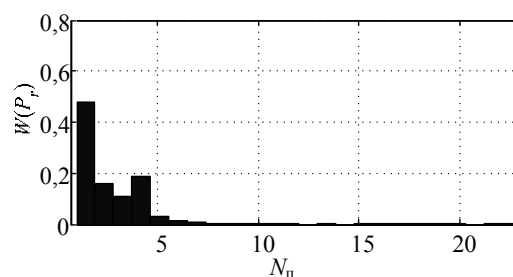


Рис. 2. Распределение количества одновременно наблюдаемых помех по результатам трёхсуточных наблюдений (частотный диапазон 400–450 МГц)

ражающие типовой характер активности и динамики изменения мощности помех, иллюстрируются рис. 3.

Рис. 3. Частотно-временное представление мощности помех в диапазоне 433–435 МГц

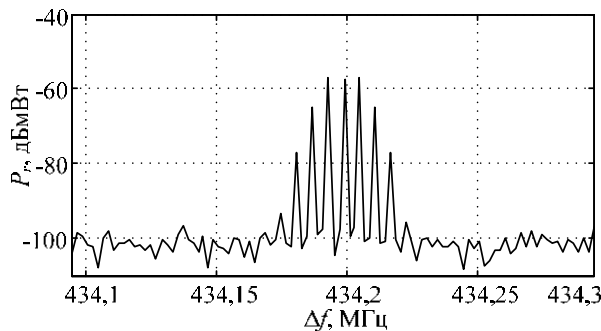
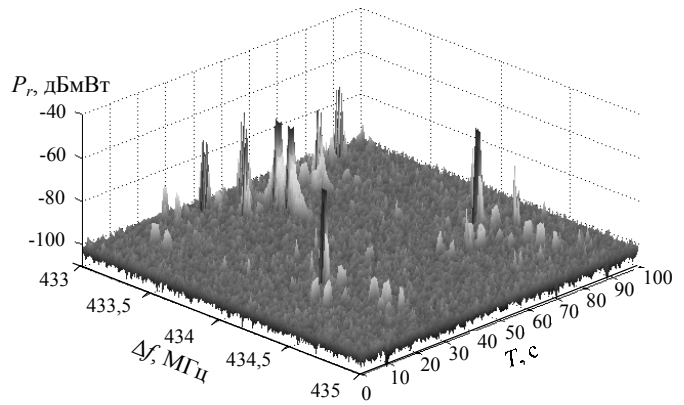


Рис. 4. Реализация спектрального представления сигнала источника помехи с амплитудной модуляцией, наблюдаемая в измерениях

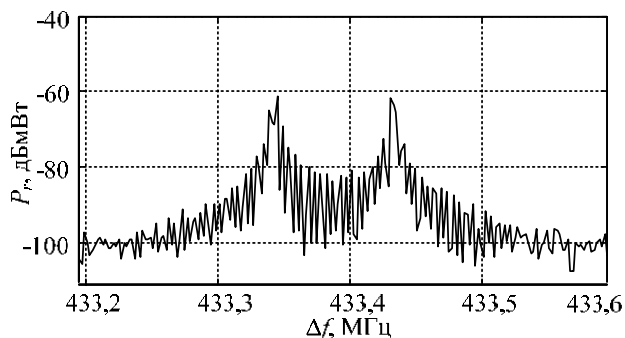


Рис. 5. Реализация спектрального представления сигнала источника помехи с двухчастотной частотной модуляцией, наблюдаемая в измерениях

Анализ полученных экспериментальных материалов показал, что многие источники помех многократно используют частотный ресурс с различной периодичностью, а подавляющее большинство наблюдаемых помех имеет в 30% случаев амплитудную многотональную модуляцию (рис. 4) или двухчастотную частотную манипуляцию в 60% случаев (рис. 5).

Представленные выше результаты по пункту № 1 сведены в табл. 2.

Результаты количественных оценок параметров помех были обобщены как для одного пункта (использовались суточные данные), так и для всех пунктов (использовались итоговые данные по каждому пункту). В качестве обобщённой характеристики каждого параметра использовалось среднее значение. Результаты обработки представлены в табл. 3. Полученные статистические оценки мощности радиопомех в диапазоне 433 МГц согласуются с единичными результатами измерений, полученными в г. Москве [8].

Таблица 2

Количественные характеристики радиопомех по результатам измерений в пункте № 1 (перекрёсток ул. Учебная – пр. Ленина г. Томска)

Параметр помехи	Значение
Вероятность наблюдения помехи D	От 6 до 9% от общего времени наблюдения
Вероятность наблюдать в частотном диапазоне 400 до 450 МГц одновременно:	
– одну помеху ($N = 1$)	83%
– две помехи ($N = 2$)	15%
– три помехи ($N = 3$)	1,5%
Интервал времени между помехами $\Delta T = \Delta T_{\text{ср}} \pm \Delta T_{\text{ск}}$	От 22 ± 17 с (для частот от 433 до 440 МГц) до $1,5 \pm 1,2$ ч (для частот от 405 до 407 МГц)
Минимально наблюдаемый интервал времени между помехами $\Delta T_{\text{мин}}$	От 2 до 8 с (в зависимости от частоты в диапазоне 400–450 МГц)
Длительность помехи $T = T_{\text{ср}} \pm T_{\text{ск}}$	2 ± 1 с (в зависимости от частоты в диапазоне 400–450 МГц)

Продолжение табл. 2

Максимальная длительность помехи $T_{\text{макс}}$	От 1 до 9 с (в зависимости от частоты в диапазоне 400–450 МГц)
Тип модуляции	Амплитудная многотональная, двухуровневая частотная
Средняя мощность помех	–65 дБмВт
Флуктуации мощности помех	7,5–8 дБмВт
Полная мощность помех	–63 дБмВт
Максимальная мощность помех	–52 дБмВт

Таблица 3

Статистические характеристики радиопомех диапазона 433 МГц в городских условиях (г. Томск)

Средние за трое суток статистические характеристики радиопомехи по каждому пункту	Пункт №1	Пункт №2	Пункт №3	Пункт №4	Среднее
Вероятность наблюдения помехи D , %	7	7,5	2,7	3,8	5,25
Наиболее вероятное количество X одновременно наблюдаемых источников помех в частотном диапазоне 430 до 435 МГц	1	9	2	2	4
Ожидаемый интервал времени между помехами *, ч	0,01	2	1,6	0,7	1,08
Минимально наблюдаемый интервал времени между помехами *, с	2	2	1,0	1,0	1,5
Длительность помехи (средн. – макс.), с	2,2–9,0	1,3–6,0	1,2–10,0	1,2–22,3	1,7–15,3
Средняя мощность помех, дБмВт	–65,0	–61,2	–62,0	–65,6	–63,47
Флуктуации мощности помех, дБмВт	7,7	9,0	14,8	11,9	10,8
Полная мощность помех, дБмВт	–63,0	–60,5	–60,1	–64,5	–62,0
Максимальная мощность помех, дБмВт	–52,0	–40,5	–29,7	–36,7	–39,7

* В диапазоне частот 430–440 МГц.

Заключение. Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы. Статистическая обработка результатов экспериментальных измерений параметров радиопомех в четырёх пунктах города различной оживлённости показывает, что:

- вероятность наблюдать радиопомехи в частотном диапазоне 430–435 МГц составляет в среднем около 6%;
- с вероятностью около 3% возможно одновременно наблюдать в среднем 6 источников помех, максимальная мощность каждого из которых может достигать минус 38 дБмВт;
- помехи возникают с интервалом в среднем до 1,5 ч, минимально наблюдаемый интервал времени между помехами достигает в среднем 1,6 с;
- средняя длительность помехи составляет около 1,73 с, максимальная – 14 с.

Представленные результаты могут быть использованы на этапе системного проектирования радиомодемов в диапазоне 433 МГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по контракту № 02.G25.31.0107 от 14 августа 2014.

Литература

1. Государственная комиссия по радиочастотам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.minsvyaz.ru/ru/activity/advisories/7/>, свободный (дата обращения: 18.02.2015).
2. Уайт Дж. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи: межсистемные помехи. – М.: Сов. радио, 1977. – 348 с.
3. Вишневский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
4. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
5. Павлюк М. Комплексное решение компании «Миландр» для учета потребления энергоресурсов / М. Павлюк, Ю. Сахно, В. Малых // Электроника НТБ. – 2014. – № 2. – С. 78–81.
6. Использование диапазонов 433 и 868 МГц в системах промышленной телеметрии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/2187/doc/58633/>, свободный (дата обращения: 16.02.2015).

7. Набиев И.Н. Исследование электромагнитных излучений от электронных средств / И.И. Набиев, И.М. Шаяхметов // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Перспективные информационные технологии». – Самара, 2014, 30 июня – 4 июля. Самара, 2014. – С. 220–222.
8. Использование радиопреуправления на 433 МГц в Москве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://msooper.ucoz.net/news/ispolzovanie_radioupravlenija_na_433_mgc_v_moskve/2014-05-15-159, свободный (дата обращения: 16.02.2015).
9. Ångskog P. Sources of disturbances on wireless communication in industrial and factory environments / P. Ångskog, C. Karlsson, J.F. Coll, J.F. Chilo, P. Stenumgaard // IEE Electromagnetic Compatibility. – 2010. – P. 281–284.
10. Chilo J.F. APD measurements for characterization and evaluation of radio interference in steel mill / J.F. Chilo, C. Karlsson, P. Ångskog, P. Stenumgaard // IEEE EMC symposium. – 2009. – Vol. 2. – P. 625–628.
11. Coll J.F. Radio-frequency electromagnetic characterization in factory infrastructures / F. J. Coll, J. Chilo, B. Slimane // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2012. – Vol. 54, № 3. – P. 708–711.
12. Yonemoto N. RF emission measurement of 433 MHz RFID tags for EMI evaluation to onboard instruments of aircrafts / N. Yonemoto, K. Yonemoto, K. Yamada, T. Hirata // IEEE Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. – 2007. – P. 232 – 235.
13. ГОСТ 30805.16.2.2–2013 (CISPR 16-2-2:2005). Методы измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости. Измерение мощности радиопомех [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.irtechnologies.ru/files/GOST%2030805.16.2.2-2013.pdf>, свободный (дата обращения: 07.11.2014).

Вершинин Александр Сергеевич

Канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник каф. телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР) ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-88-18
Эл. почта: as_vershinin@mail.ru

Майков Денис Юрьевич

Канд. техн. наук, программист каф. ТОР ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-88-18
Эл. почта: maykov_du@mail.ru

Ушарова Дарья Николаевна

Главный конструктор Центра проектирования систем ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-88-18
Эл. почта: usdnwh@yandex.ru

Аникин Алексей Сергеевич

Канд. техн. наук, ассистент каф. радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-38-98
Эл. почта: rbk@sibmail.com

Vershinin A.S., Maykov D.U., Usharova D.N., Anikin A.S.

Experimental evaluation of the statistical characteristics of narrowband interference band 433 MHz in urban areas

The results of the experimental estimation the statistical characteristics of power capacity, the probability of observing, the number and duration of the interference. The interference is received in urban areas from the narrowband radiation sources with omnidirectional antennas in the range of 433 MHz. It was shown that in the band of 430–435 MHz six sources of interference with a maximum power –38 dBm occur with the probability about 3%.

Keywords: interference, range of 433 MHz, power, probability, duration, number of noise sources.